

Evaluación de los principales sistemas de estructuras de apoyo en energía eólica marina – Retos y requerimientos tecnológicos para el año 2020

Oscar Yanguas Miñambres

Proyecto Fin de Carrera: Ingeniería Industrial

Fecha de entrega:

Supervisor:

Nurten Avci

Co-supervisor:

Julio Usaola Garcia

Este proyecto fin de carrera ha sido fruto de un acuerdo de colaboración entre la Karlshochschule International University y la Universidad Carlos III de Madrid.

Comencé a interesarme en el campo de la energía eólica marina durante una conferencia a la que asistí en mi último año de carrera y finalmente, el poder investigar sobre este tipo de tecnología, se ha convertido en un camino muy gratificante, ya que estoy seguro que esta energía se convertirá en una fuente de abastecimiento esencial en el futuro. Espero que este proyecto sea el primer paso sobre un asunto en torno al cual me gustaría que girara mi carrera profesional. Ha sido un viaje lleno de nuevos desafíos pero que, al mismo tiempo, han resultado muy enriquecedores.

Me gustaría aprovechar esta oportunidad para dar las gracias a todos aquellos que han hecho posible que este proyecto fin de carrera salga adelante.

Mi más sincera gratitud para mi supervisora la Doctora Nurten Avci por su paciencia y comprensión durante mis momentos de incertidumbre y cambio. Sus consejos y su apoyo me han sido de gran ayuda a la hora de centrar y desarrollar los principales desafíos de mi proyecto fin de carrera.

Merecidas gracias también a mis padres por los valores que me han inculcado a lo largo de todos mis años.

A mi novia por estar ahí tanto en los momentos buenos como en los difíciles.

Finalmente, a todos aquellos que de algún modo me han inspirado a comenzar y terminar mis estudios de Ingeniería Industrial.

Oscar Yanguas Miñambres

Agosto 2012

Resumen

La energía eólica marina es una de las tecnologías más prometedoras con la que nuestra sociedad cuenta para poder dar respuesta a la actual demanda energética. Dentro de los principales costes en el desarrollo de esta energía, el coste asociado a las estructuras de apoyo es uno de los que tiene un mayor peso. Las estructuras de apoyo de los aerogeneradores marinos se basan fundamentalmente en las investigaciones y desarrollos de la industria petrolera. En la actualidad existen diferentes soluciones que intentar lograr el resultado más satisfactorio en función de las condiciones operativas cambiantes y ayudar con ello a abaratar el coste total de la energía.

La representación de los diferentes tipos de estructuras de apoyo en el mercado actual presenta importantes diferencias entre unas soluciones y otras. En algunos casos esta desviación se asocia a la mayor madurez de una solución tecnológica frente a otra, sin embargo, una mayor adaptabilidad a las diferentes condiciones ambientales o mejores ventajas en el aprovechamiento energético pueden ser identificadas como otras causas. De una forma y otra, el desarrollo de estructuras de apoyo para aerogeneradores eólicos se encuentra en constante evolución y nuevos conceptos e ideas continúan llegando actualmente al mercado. Por estas razones, la idea acerca de cuál será el tipo de estructura de apoyo con mayor probabilidad de prevalecer en el futuro continúa estando todavía en el aire.

A través de un método de evaluación tecnológica, este proyecto fin de carrera introduce consideraciones para el desarrollo de estructuras de apoyo de energía eólica marina en función de los principales desafíos y necesidades tecnológicas que afectarán la evolución de la industria del año 2020 en adelante. Aplicando un estudio de investigación Delphi y gracias a la opinión de expertos independientes, este proyecto fin de carrera identifica inicialmente los escenarios más probables de ocurrir en esas fechas y, a continuación, compara la conveniencia o no de las actuales estructuras de apoyo para poder superarlos con éxito.

RESUMEN EN ESPAÑOL

Índice

| | |
|--|-----------|
| Índice de Figuras | vii |
| Índice de Tablas | viii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Objetivos del Proyecto | 5 |
| 1.3 Metodología de Investigación | 6 |
| 1.4 Organización del Proyecto | 8 |
| 2 Estado del Arte | 9 |
| 2.1 Elementos Clave | 9 |
| 2.2 Definición y Componentes | 12 |
| 2.3 Revisión de Conceptos | 15 |
| 3 Metodología..... | 16 |
| 3.1 Método Delphy | 16 |
| 3.2 Etapas de la Encuesta..... | 18 |
| 4 Resultado de Encuestas..... | 19 |
| 4.1 Respuestas al Primer Cuestionario | 19 |
| 4.2 Respuestas al Segundo Cuestionario | 22 |
| 5 Conclusiones | 26 |
| 5.1 Discusión | 26 |

Índice de Figuras

| | | |
|----------|---|----|
| Figura 1 | Capacidad de energía eólica | 3 |
| Figura 2 | Cargas sobre las estructuras de apoyo marinas | 12 |
| Figura 3 | Conceptos de estructuras de apoyo | 15 |
| Figura 4 | Acuerdos entre la pregunta 1 y la pregunta 2 | 26 |
| Figura 5 | Relación entre desafíos y estructuras de apoyo | 27 |
| Figura 6 | Relación entre requerimientos tecnológicos y estructuras de apoyo | 28 |

Índice de Tablas

| | | |
|-----------------------------|---|----|
| Tabla 1 | Costes de inversión energía eólica marina y terrestre | 10 |
| Tabla 2 | Desglose de costes de inversión energía eólica marina y terrestre | 11 |
| Tabla 3 | Diferentes conceptos de estructuras de apoyo | 14 |
| Tabla R1-Q1 | Resumen de respuestas a la Pregunta 1 | 20 |
| Tabla R1-Q2 | Resumen de respuestas a la Pregunta 2 | 20 |
| Tabla R1-Q3 | Resumen de respuestas a la Pregunta 3 | 21 |
| Tabla R1-Q4 | Resumen de respuestas a la Pregunta 4 | 21 |
| Tabla R2-Q5 | Resumen de respuestas a la Pregunta 5 | 23 |
| Tabla R2-Q6 | Resumen de respuestas a la Pregunta 6 | 24 |
| Tabla R2-Q7 | Resumen de respuestas a la Pregunta 7 | 24 |
| Tabla R2-Q8 | Resumen de respuestas a la Pregunta 8 | 25 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La creciente demanda energética a la que se está viendo sometida nuestra sociedad puede ser considerada como una consecuencia de factores tales como el incremento global de la población, la continua escalada del consumo eléctrico, los nuevos avances tecnológicos o de el impacto que las economías emergentes, particularmente entre los países Asiáticos, está teniendo sobre la economía mundial. La combinación de estos factores ha contribuido a la necesidad de buscar una mayor explotación de los recursos energéticos disponibles.

Algunas de las tecnologías que durante años han sido consideradas como prototipos están siendo ahora vistas como parte de la solución a este nuevo panorama energético. Hasta el momento todavía no se ha alcanzado ninguna solución definitiva en este respecto pero, paso a paso, se está dando forma a un nuevo mix energético que, al menos, permite limitar nuestra dependencia de los recursos fósiles.

En realidad, es justo decir que nuestra vulnerabilidad a los recursos fósiles ha sido un factor clave en la necesidad de dibujar una nueva estrategia energética. Su definición de recursos finitos en nuestro planeta, las fluctuaciones de sus precios o las decisiones políticas de sus principales países productores son algunos ejemplos de cómo estos recursos están afectando nuestra sociedad. Pero en adición a de estas motivos existe otro que puede ser considerado como el principal impulsor del nuevo plan energético, el deterioro de nuestro entorno y el acelerado calentamiento del planeta.

El calentamiento global se ha convertido en uno de los retos más importantes que al que nuestra sociedad necesita hacer frente en el siglo XXI. El nuevo objetivo no es solo producir más energía, sino tener la capacidad de producirla

de una manera más limpia y sostenible, minimizando, en la mayor medida posible, el efecto sobre el medioambiente.

La energía eólica es una de las energías alternativas con un futuro más prometedor a la hora de enfrentarnos a este dilema energético. Es una energía limpia, se puede producir en grandes cantidades y además es inagotable.

En la Unión Europea, los objetivos fijados para incrementar los ratios de producción energética mediante métodos de energía alternativa han sido muy ambiciosos. En 2009, todos los miembros de la Unión Europea firmaron la *Renewable Energy Directive* por la cual todos los países miembros se comprometían a incrementar su producción de energía renovable en la Unión Europea hasta un ratio del 20% en el año 2020. De acuerdo a datos de EUROSTAT, en 2010, la contribución energética mediante fuentes renovables se estimó en el 12.4 por ciento de la energía neta consumida, lo que es un buen reflejo de las buenas prácticas que están llevando las políticas energéticas comunitarias.

La energía eólica representa no solo una buena parte importante de este incremento. En realidad, de todas las energías renovables, la energía eólica es la tecnología que más ha aumentado su capacidad de producción [2]. En 2011, esta energía creció a un ratio de un 20 por ciento hasta alcanzar, aproximadamente, 238GW. En el caso de la Unión Europea en particular, donde han tenido lugar las mayores inversiones en este sentido, la capacidad eólica alcanzada a finales del 2011 era suficientemente alta como para producir, considerando el consumo de un año medio, el 6,3 por ciento del consumo total neto de la Unión Europea [3].

Actualmente la energía eólica está dominada principalmente por instalaciones eólicas terrestres. De acuerdo a la información de *The European Wind Energy Association* (EWEA), en 2011, la energía eólica marina representaba únicamente el 4 por ciento de la capacidad eólica total instalada en la Unión Europea. Sin embargo, esta proporción prevé un fuerte incremento hasta niveles de entre el 17 y el 22 por ciento en el año 2020¹. En el informe de *Pure Power - Wind energy targets for 2020 and 2030* (2009) el EWEA definió un objetivo de entre 140 y 190 GW y de 40 GW para la energía eólica terrestre y la marina respectivamente [4].

WIND POWER CAPACITY

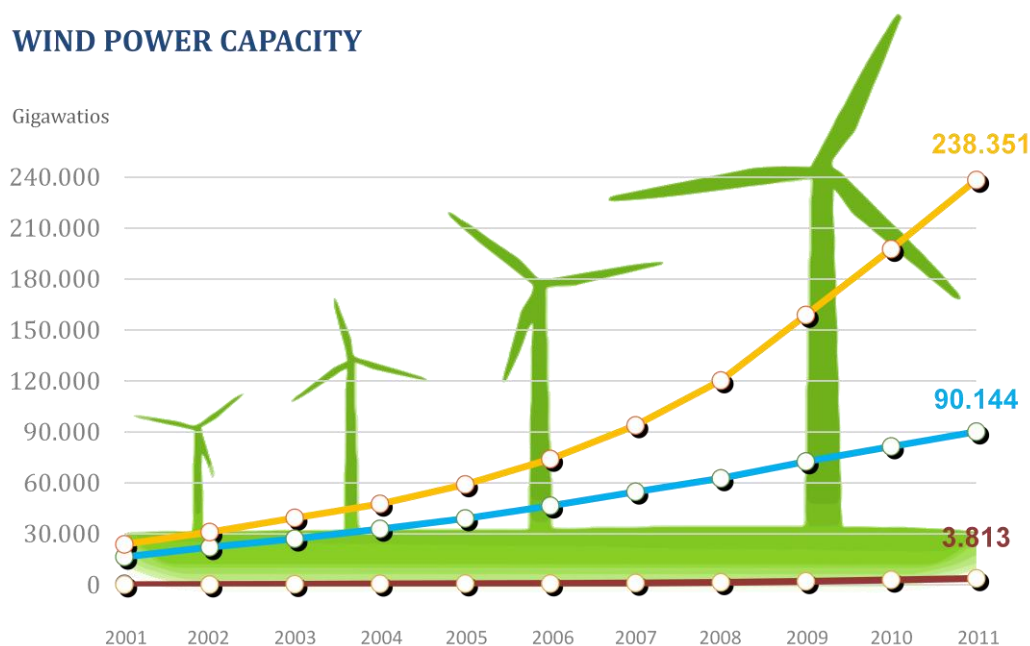


Figura 1. Línea naranja: Capacidad de energía eólica global – Línea Azul: Capacidad de energía eólica en la UE – Línea Marrón: Capacidad de energía eólica marina en la UE [1 - 2 - 3]

¹ Datos según la estimación baja de la energía eólica marina en lo que respecta a la estimación alta y baja de la energía eólica total en 2020

La diferencia más obvia a la hora de comparar la energía eólica marina y la terrestre reside en los diferentes entornos sobre los que dichas formas de producción energética tienen lugar.

Respecto a las ventajas y desventajas existentes entre ellas, la energía eólica marina presenta importantes contribuciones que hacen su desarrollo más atractivo en comparación con la eólica terrestre. La primera de estas ventajas es la mejor calidad que el viento presenta en las zonas situadas mar adentro. Generalmente, cuanto más grande es la distancia de un parque eólico marino con respecto a la costa, mayor y más uniforme es la velocidad del viento. Como consecuencia, las turbulencias sobre los aerogeneradores disminuyen, reduciendo también la fatiga y las cargas a las que se ven sometidas y prolongando, como consecuencia, la vida útil de las instalaciones. Otra de las ventajas de la energía eólica marina tiene que ver con su localización. Algunos países encuentran dificultadas a la hora de fijar lugares sobre los que establecer sus instalaciones eólicas terrestres. En el caso de los proyectos marinos, dada la mayor proporción de agua/tierra que presenta nuestro planeta, estos cuentan con una mayor disponibilidad de zonas sobre las que desarrollar instalaciones de gran escala. Al mismo tiempo, se eliminan también muchas de las barreras asociadas a la energía eólica terrestre, tales como la

contaminación visual y auditiva. Por último, es necesario añadir que la energía eólica marina presenta menores limitaciones a la hora de transportar las diferentes partes de estas instalaciones. Por ejemplo, en el caso de aerogeneradores de gran tamaño su movilidad por la red de transporte terrestre es en ocasiones imposible.

Sin embargo, respecto a las desventajas de la energía eólica marina, cabe destacar las condiciones ambientales más hostiles que presenta el mar, dando como resultado unos procesos de construcción y operativos más complejos. El diseño y resistencia de los diferentes elementos de una instalación deben ser elegidos para poder soportar altos niveles de humedad y corrosión marina. Esta combinación de circunstancias hace que sus costes se vean altamente incrementados. Actualmente, la energía eólica marina tiene unos ratios de coste de inversión muy por encima de los asociados con la eólica terrestre. El coste final del megavatio es todavía muy alto y la capacidad de reducirlo jugará un papel muy importante en el éxito de este tipo de energía durante los próximos años.

Los planes para expandir la energía eólica marina presentan un gran desafío para nuestra sociedad y por ello su desarrollo y expansión necesita ser guiada por avances tecnológicos que permitan ajustar su producción a unos costes económicamente viables.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto fin de carrera consiste en estudiar los principales conceptos de estructuras de apoyo existentes actualmente dentro de la energía eólica marina y decidir cuál o cuáles presentan la mayor probabilidad de éxito de acuerdo a los desafíos y necesidades tecnológicas a los que industria debe enfrentarse a partir del año 2020.

Los diferentes conceptos de estructuras de apoyo de aerogeneradores marinos son descritos y analizados atendiendo a sus principales características de diseño, construcción, instalación y transporte.

Las estructuras de apoyo son clasificados como monopilares, de apoyo por gravedad, jackets, tripods, tripiles, monopilares flotantes y plataformas semisumergibles. Los cinco primeros conceptos pertenecen al grupo de estructuras montadas sobre el suelo marino, mientras que las dos últimas pertenecen al grupo de estructuras flotantes.

Los desafíos y avances tecnológicos previstos para el año 2020 y sucesivos son definidos y seleccionados gracias a un consenso establecido por un grupo de expertos en la materia que participan en una proceso de investigación Delphi.

1.3 Metodología de Investigación

Las empresas dedicadas al desarrollo de estructuras de apoyo para la energía eólica marina se encuentran actualmente en un período de extensa investigación. La industria está expandiendo sus límites hacia nuevos horizontes en términos de profundidad del fondo marino y distancias a las líneas de costa. Esto conlleva un esfuerzo por parte de las empresas involucradas para adaptarse al nuevo entorno y mantenerse a flote con la tendencia actual. En el campo de las estructuras de apoyo, hay un constante desarrollo de nuevos conceptos en búsqueda de soluciones que puedan aportar una mejor y más eficiente respuesta a las actuales demandas del mercado.

Para cumplir con el objetivo de este proyecto fin de carrera de predecir el futuro acerca de las estructuras de apoyo que se convertirán en referencia más allá del año 2020 es necesario emplear una metodología de investigación que sea capaz de dar una respuesta satisfactoria y precisa a un futuro con tan alto grado de incertidumbre.

Las diferentes metodologías de investigación pueden ser clasificadas en uno de los siguientes grupos:

- Métodos basados en la opinión de un grupo de expertos y su capacidad de alcanzar un consenso.
- Métodos basados en la extrapolación de datos históricos para predecir el futuro.
- Métodos basados en la correlación de los diferentes aspectos involucrados en el problema y su grado de influencia.

De entre todos estos métodos, y para el caso particular de este estudio, la extrapolación de los datos no puede ser definida como una solución factible. Una parte importante de las actuales de estructuras de apoyo están basados en tecnologías relativamente nuevas (ejemplo, estructuras de apoyo flotantes) con escaso número de proyectos en activo. Por ello, la recolección de datos históricos se ve claramente limitada. De este modo, el número de caminos disponibles en la búsqueda de nuestra solución queda reducido a dos.

Los métodos basados en la correlación de los diferentes factores que intervienen en un problema representan una solución útil para cuantificar la importancia de esos factores. Sin embargo, el obstáculo principal reside en la forma de medir esa relevancia, en cómo determinar los grados de influencia. Por ejemplo, para el caso de las estructuras de apoyo, definir el efecto de la profundidad del agua sobre estas es una tarea exclusivamente al alcance de ciertos expertos con gran nivel conocimiento e “información real”. De hecho, incluso tras el análisis de estudios por parte de esta comunidad, diferentes puntos de vista son observados. En consecuencia, la decisión del método a aplicar en este proyecto fin de carrera no puede estar basado exclusivamente en métodos de correlación, sino que ha de ser complementado con metodologías basadas en opiniones de expertos.

En el caso de este último grupo de metodologías, el primer reto que se presenta es la selección de un grupo de expertos con conocimientos que cubran las diferentes etapas en el ciclo de vida de las estructuras de apoyo eólicas marinas. De acuerdo con los objetivos de este proyecto, el objetivo es buscar una representación igualitaria de expertos para cada uno de los tipos de estructuras de apoyo, así como sus fases de diseño, fabricación, instalación y mantenimiento. Sin embargo, fijándonos en la lista de proyectos operativos de energía eólica marina en Europa ([Anexo 1](#)), se puede observar que, en función del país seleccionado, existe uno u otro tipo de estructura de soporte predominante. Por tanto, el contacto directo con expertos mediante entrevistas, visitas a empresas, llamadas internacionales o incluso la idea de promover grupos de discusión activa, se hace realmente difícil con los recursos y los límites de esta investigación.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la metodología empleada para el desarrollo de este estudio basa su enfoque en la combinación de los métodos basados en opiniones de expertos y los basados en la correlación de diferentes aspectos del problema. En concreto, la sistema elegido es el método Delphi, una técnica que encaja perfectamente con estas características, siendo capaz de dar respuesta a aspectos cualitativos y cuantitativos.

El método Delphi es un procedimiento de investigación con gran flexibilidad, que no requiere de una interacción directa de los participantes y con una más que demostrada trayectoria en estudios para pronosticar el futuro de diferentes desarrollos tecnológicos.

1.4 Organización del Proyecto

El **capítulo II** comienza con una breve revisión de la importancia que la energía eólica marina está adquiriendo actualmente dentro del nuevo marco de políticas para la promoción de energía renovables. A continuación se definen cada una de las partidas clave en términos de costes de inversión para el desarrollo de proyectos de energía eólica marina, así como el peso de cada una de estas partidas tiene en relación a su conjunto total. Posteriormente el capítulo ofrece una descripción de los principales conceptos de estructuras de apoyo para aerogeneradores eólicos y define los requisitos en relación a sus etapas de diseño, fabricación y procesos de instalación. Finalmente se establece un análisis de ventajas y debilidades para cada uno de los conceptos.

El **capítulo III** presenta el método de investigación Delphi. Esta es la técnica empleada para estudiar y comparar la adaptabilidad de los conceptos de estructuras de apoyo citados en el capítulo II a las futuras condiciones de la industria eólica marina. El capítulo comienza con la definición de las bases del método y prosigue con una descripción de las distintas etapas seguidas durante su aplicación. Este capítulo tiene por objetivo proporcionar un conocimiento suficiente sobre el método, su sistema de evaluación y su proceso de ejecución.

El **capítulo IV** contiene la discusión de los resultados y conclusiones obtenidos gracias al método de investigación Delphi.

El **capítulo V** es la conclusión de los principales logros y evaluación final del proyecto fin de carrera.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Impulsores

En las últimas décadas, la energía eólica ha experimentado una transición desde las llanuras y montañas de nuestra orografía terrestre hacia nuevos horizontes más allá de nuestras costas. La base de este cambio yace principalmente en la mayor calidad que el viento presenta en estas zonas en términos de generación de energía. Mientras que en las primeras etapas de esta transición los parques eólicos eran instalados cerca de la costa, con una tecnología actualmente más desarrollada y perfeccionada, los nuevos proyectos eólicos marinos tienden a ubicarse en zonas más remotas, alcanzando mayores niveles de profundidad oceánica y distancias a las líneas de costa.

Tanto en la energía eólica terrestre como en la energía eólica marina son producidas por acción del viento, es decir, mediante la energía cinética generada por las corrientes de aire. Sin embargo, el medio ambiente al que han de hacer frente cada uno de estos proyectos es en líneas generales bastante opuesto. Por ello, y en función de si nos situamos sobre tierra o en el mar, será necesario definir un tipo diferente de enfoque para la instalación del parque eólico.

En cuanto al nivel de costes involucrados, la generación de energía eólica marina es significativamente más alta que los parques eólicos en tierra. Parece obvio que, a priori, la construcción de parques eólicos marinos sea más cara y en general más compleja que los que se establecen en tierra. Sin embargo, mejoras y desarrollos tecnológicos pueden reducir potencialmente esta situación.

En 2009, Risø publicó el informe *The economics of wind power*, donde se definían los costes de capacidad de parques eólicos en tierra en comparación con los situados en alta mar. Para ello se tenían en cuenta datos

pertenecientes a varios proyectos eólicos europeos. De acuerdo con los resultados de este informe, el coste medio de inversión para un parque eólico terrestre varía típicamente entre 1 millón € / MW y 1,35 millones € / MW, frente a los parques eólicos marinos donde los costos pueden aumentar hasta los 2,7 millones € / MW, casi el doble de caro [2]. Estas cifras también son comparables a los cálculos de otros estudios como el de McDonald (2010) y Blanco (2009).

Un resumen de los resultados encontrados en estos informes es presentado en la [Tabla 1](#).

Cost estimates for onshore and offshore wind parks

| | Mott MacDonald ⁽¹⁾ | | M. I. Blanco | | Riso | |
|------|-------------------------------|----------|--------------|----------|---------|----------|
| | Onshore | Offshore | Onshore | Offshore | Onshore | Offshore |
| Low | 1.335 | 2.320 | 1.100 | 1.800 | 1.000 | 1.200 |
| High | 1.680 | 3.350 | 1.400 | 2.500 | 1.350 | 2.700 |

⁽¹⁾ For Nth of a kind offshore wind turbine

Data in € million/kW

Tabla 1. Estimación de costes de parques eólicos terrestres y marinos [2 - 3 - 4]

Estas diferencias de costes entre las instalaciones eólicas marinas y las terrestres suelen atribuirse al mayor tamaño y potencia de los aerogeneradores presentes en el mar, así como a su mayor complejidad en los modelos de instalación [2]. La [Tabla 2](#) muestra un desglose de los costes para cada tipo de energía eólica. La tabla está basada en información de diferentes fuentes y representa el porcentaje que cada tipo de coste tiene en relación al coste total de inversión. Estas cifras permiten identificar las partidas con mayor influencia dentro de los proyectos eólicos. Las siguientes son algunas de las conclusiones que son observadas:

- La energía eólica terrestre está dominada por el coste de la turbina eólica llegando a representar hasta un 75 por ciento del coste total de inversión. En el caso de la eólica marina su peso se reduce hasta el 49 por ciento.
- Los costes de instalación tienen una mayor importancia en la eólica marina que en la terrestre. Esto se debe a las mayores restricciones y complicaciones durante el transporte e instalación de estas estructuras en el mar.

- Al igual que en los costes de instalación, los costes de conexión del cable eléctrico tienen un mayor peso en la eólica marina que en la terrestre.
- El coste de las estructuras de apoyo eólicas marinas aumenta en casi 4 veces comparado a las estructuras terrestres. Esto es fruto de sus mayores necesidades funcionales y de su superior número de configuraciones.

Investment cost breakdown for onshore and offshore wind parks

| | Risø ⁽¹⁾ (2009) | EEA ⁽²⁾ (2009) | EWEA ⁽³⁾ (2009) | RenewableUK (2011) |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| | Onshore | Offshore | Offshore | Offshore |
| Turbine | 75 | 43 | 49 | 40 |
| Support structure | 6 | 20 | 21 | 19 |
| Installation | 2 | 26 | | 23 |
| Grid connection | 9 | 7 | 21 | 14 |
| Project | 3 | 4 | 9 | 4 |
| Land infrastructure | 5 | | | |

⁽¹⁾ Los costes de Financiación y Consultoría han sido agrupados como costes de Proyecto. Los costes relativos a la Construcción de Carreteras y Terrenos han sido agrupados como costes de Infraestructura.

⁽²⁾ El reparto de costes hace referencia al escenario base de 1.8 million €/MW del informe EEA (2009).

⁽³⁾ Los costes de Instalación son repartidos entre otros cuatro elementos.

Tabla 2. Desglose de costes para parques eólicos marinos y terrestres [2 - 12 - 4 - 26]

Como resumen, los proyectos de energía eólica marina no están dominados por los costes de la turbina, sino por otros aspectos tales como los costes eléctricos y costes de las estructuras de apoyo. Este último, es el que presenta un mayor incremento en comparación con la eólica terrestre. Las estructuras de apoyo se convierten en uno de los principales motores en el coste total de inversión para este tipo de proyectos y, en consecuencia, un elemento de enorme interés para que la industria sea más eficiente económicamente.

2.2 Definición y Componentes

Definición

Para el propósito de este proyecto fin de carrera, la estructura de apoyo es definida como todo aquello posicionado por debajo de la torre eólica, incluyendo las estructuras de fijación ancladas al suelo. Esta interpretación es representada en la [Figura 3 \(C\)](#).

Por su parte, la estructura de apoyo se divide en dos partes principales, la subestructura y los cimientos. Estos componentes, así como las otras partes de un aerogenerador eólica marino, se describen de la siguiente manera:

- **Turbina:** por lo general consta de dos elementos, las aspas u hojas que captan la energía del viento, y la cabeza, donde se encuentran el generador y la caja de cambios.
- **Torre:** sirve como sustento para la turbina. Generalmente es proporcionado por el fabricante de la turbina. Su diseño más común es un cilindro de acero.
- **Subestructura:** es la parte superior de la estructura de apoyo que se extiende desde el suelo marino hasta la parte inferior de la torre.
- **Cimiento:** es la parte inferior de la estructura de apoyo y se encuentra en contacto directo con el suelo. Transfiere las cargas de la turbina al subsuelo marino.
- **Anclaje:** es el sistema empleado por los aerogeneradores flotantes para ser anclados en alta mar.

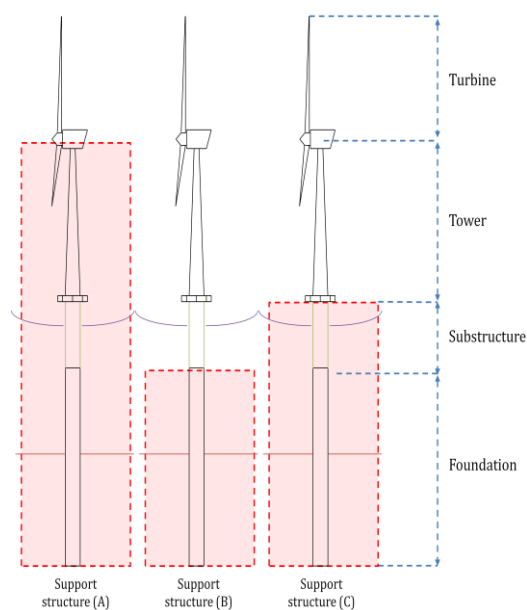


Figura 2. Definición y componentes de las estructuras de apoyo.

Componentes

El estado del arte de los conceptos de estructuras de apoyo eólicas marinas puede ser clasificado en dos grupos, las estructuras montadas sobre estructuras fijas y las estructuras flotantes. La diferencia principal radica en la forma en que el aerogenerador es unido al fondo marino.

Las estructuras de apoyo de tipo fijo pueden ser clasificadas por el tipo de cimiento utilizado en su construcción.

- Cimientos por pilares
- Cimientos por gravedad
- Cimientos por succión

Las estructuras de apoyo de tipo flotante pueden ser clasificadas en función al sistema de anclaje al fondo marino:

- Anclajes
- Pilares
- Estructura de succión

Con respecto a la configuración de la estructura de apoyo, las basadas en sujeción fija pueden ser divididas en 5 tipos básicos:

- Monopilar
- De apoyo por gravedad
- Tripod
- Jacket
- Tripile

En el caso de las estructuras de apoyo flotante, 3 son los modelos que presentan una mayor proyección actualmente.

- Monopilar flotante (Spar)
- Plataforma semisubmergible
- Plataforma de apoyo en tensión (TLP)

Las diferentes categorías y subcategorías, tanto para las estructuras de apoyo fijas como para las flotantes son representadas en la [Tabla 3](#).

| Offshore Wind Support Structures | | | |
|---|----------------|-----------------------------|----------------|
| Bottom-Mounted Fixed Support Structures | | Floating Support Structures | |
| Structure | Foundation | Structure | Foundation |
| Monopile | Pile | Spar Floater | Anchor |
| Gravity | Gravity Base | Semisubmersible | Pile |
| Jacket | Suction Bucket | Tension Leg Platform | Suction Bucket |
| Tripod | | | |
| Tripile | | | |

Tabla 3. Diferentes tipos de cimientos y subestructuras dentro de las estructuras de apoyo eólicas marinas.

2.3 Revisión de Conceptos

Las combinaciones posibles entre subestructuras y estructuras de apoyo son muy diversas. Además, es necesario tener presente que, en relación a las estructuras de apoyo, la industria eólica marina se encuentra en constante búsqueda de nuevos conceptos que permitan obtener soluciones más eficientes y competitivas. Un estudio de todas las alternativas existentes estaría fuera del alcance de este proyecto fin de carrera por lo que únicamente han sido seleccionadas las soluciones con mayor representación en el mercado.

- **Monopilares**
- **De apoyo por gravedad**
- **Jacket**
- **Tripod**
- **Tripile**
- **Monopilar flotante (Spar)**
- **Plataforma semisubmergible**

En la [Figura 5](#) se representan unos croquis de los diferentes conceptos de estructuras de apoyo.

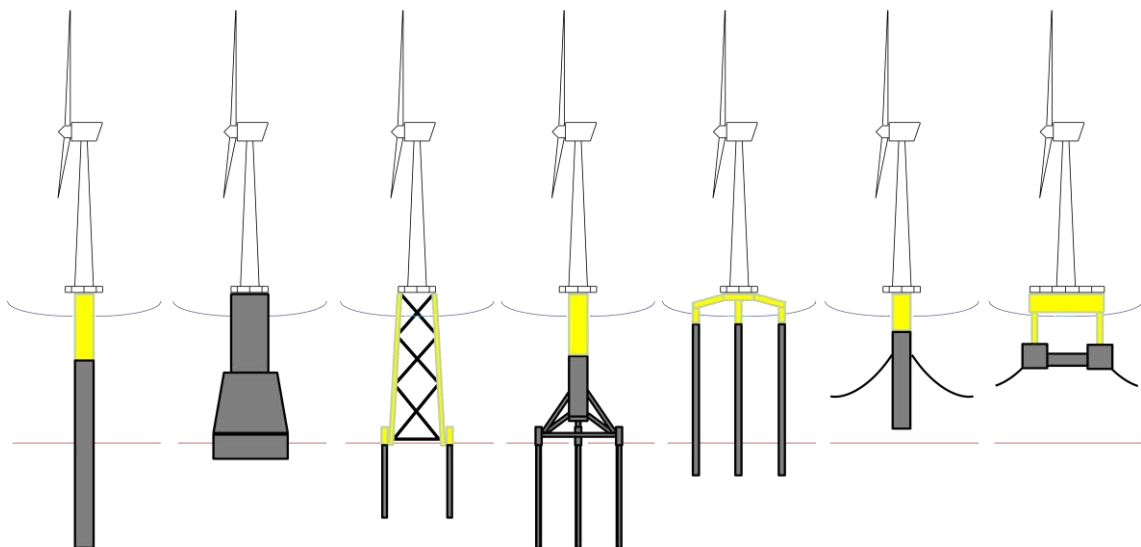


Figura 3. Conceptos de estructuras de apoyo. De derecha a izquierda: monopilar, apoyo por gravedad, jacket, tripod, tripile, spar plataforma semisubmergible

Capítulo 3

Metodología

3.1 Método Delphi

El método Delphi es uno de los métodos tradicionales en el empleo de previsiones tecnológicas. Esta técnica fue concebida en el centro de investigación norteamericano *The Rand Corporation* en los comienzos de 1950. En este primer estudio se incluyeron una serie de cuestionarios con feedback controlado a fin de predecir, mediante la opinión de un grupo de expertos, los sistemas industriales estadounidenses más probables de ser blancos de interés para los estrategas soviéticos. Desde entonces, el método Delphi se ha extendido por numerosas empresas, universidades y organizaciones hacia la previsión tecnológica de largo plazo.

La base de este método se centra en la elaboración de cuestionarios multy-round. En la primera ronda los expertos han de completar un primer cuestionario. Posteriormente, en las sucesivas rondas, además de su cuestionario respectivo, el grupo de expertos también recibe los resultados del grupo de la ronda anterior. En este punto, los expertos son impulsados a reflexionar, reconsiderar o incluso modificar sus respuestas en base a la opinión del grupo.

La clave de este método consiste en el hecho que cada experto cuenta con una opinión particular sobre de cómo el futuro de un determinado desarrollo tecnológico pueden evolucionar, pero sin embargo, cuando varios expertos son preguntados, las percepciones erróneas o débiles que algunos de los individuos pudieran tener tiende a verse equilibrada por la visión conjunta del grupo. Es decir, mediante la aplicación de feedback y a lo largo de un número concreto de iteraciones únicamente las percepciones más fuertes se hacen perceptibles.

Otra característica importante de este método es el carácter anónimo que se da a sus participantes. Este anonimato es facilitado por el uso de cuestionarios

que permiten conocer la opinión de expertos sin la necesidad de comunicarse personalmente. De esta manera el método introduce la discusión entre los participantes pero, al mismo tiempo, asegura que los puntos de vista de los expertos con mayor influencia no controlarán el resultado final.

El método está orientado a identificar aquellos temas que poseen relevancia especial en un futuro de largo plazo y se ha demostrado como más efectivo cuando la mejor información disponible es la opinión individual de expertos. Estas opiniones permiten el análisis, la clasificación y la configuración de soluciones de acuerdo a su prioridad. Dado que el grado de incertidumbre presente en el método es bastante alto, las cuestiones o temas tratados son generalmente de gran complejidad.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que existen algunos handicaps en la aplicación de esta técnica. El método Delphi requiere de mucho tiempo y responsabilidad por parte de los participantes. Por este motivo, con frecuencia es difícil convencer a los diferentes expertos a tomar parte en este tipo de investigaciones y obtener de ellos un alto grado de compromiso. En ocasiones, algunos participantes lo abandonan debido al esfuerzo que implica, especialmente después de la primera ronda. Esta tasa de abandono tiende a verse incrementada en las sucesivas rondas, haciendo que la mayoría de los estudios queden limitados a no más de tres iteraciones. Una solución a este problema ha consistido en incentivar la participación de los expertos con, por ejemplo, el suministro de los resultados del estudio.

En resumidas cuentas, la formalización de la metodología, la cantidad de datos recogidos, el número de expertos involucrados y el hecho que las opiniones divergentes se encuentran parcialmente ocultas detrás de la visión principal, son factores que han contribuido a que el método Delphi sea considerado como una de las técnicas más populares en la investigación tecnológica [5].

3.2 Etapas Encuesta de Investigación

La encuesta de investigación sobre “Estructuras de apoyo de energía eólica marina – Retos y requisitos tecnológicos para el año 2020” ha sido creada con el objeto de poder identificar los desafíos a los que la industria eólica marina tendrá que hacer frente en esa década, de determinar los progresos o mejoras tecnológicas necesarias para superar estos desafíos y de prever el comportamiento que los actuales conceptos de estructuras de apoyo de energía eólica marina deberían presentar para adaptarse con éxito a las futuras condiciones.

Los diferentes pasos que han sido implementados durante el desarrollo de la encuesta de investigación Delphi han sido definidos como:

- Diseño de cuestionarios.
- Búsqueda de compañías involucradas a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de desarrollo de las estructuras de apoyo de energía eólica marina y selección de los posibles candidatos dentro de las compañías identificadas.
- Comienzo de la ronda uno.
 - Lanzamiento del primer cuestionario.
 - Recopilación y análisis de las respuestas al primer cuestionario.
- Comienzo de la ronda dos.
 - Lanzamiento del segundo cuestionario.
 - Recopilación y análisis de las respuestas al segundo cuestionario.

Capítulo 4

Resultados de la Encuesta

4.1 Respuestas Primer Cuestionario

Las respuestas al primer cuestionario fueron recibidas entre el 11 de Julio y el día 31 del mismo mes. Aunque el número de aceptaciones para participar en la encuesta ascendió a 23, el número final de respuestas se vio reducido a 13 de un total de 100 invitaciones enviadas. Esto equivale a un ratio del 13 por ciento de todos los expertos contactados. Sin embargo, es necesario señalar que 3 de estos expertos no completaron el cuestionario en su totalidad, con lo que el ratio de encuestas rellenadas con éxito quedó finalmente fijado en un 10 por ciento.

La extensión y detalle de las respuestas en esta primera ronda del método Delphi varió considerablemente entre unos y otros expertos. Esto puede ser leído como una consecuencia del carácter de preguntas abiertas. Todas las respuestas fueron leídas y analizadas y aquellas que presentaban ideas o principios similares fueron agrupadas y categorizadas. Posteriormente, todas las categorías identificadas fueron listadas a modo de facilitar su clasificación y priorización durante la segunda ronda.

A continuación se muestran los resultados a las cuatro preguntas del primer cuestionario a fin de determinar la contribución del grupo de expertos.

Pregunta 1

Offshore Wind Support Structures Environment

| Significant Changes | Experts sharing this opinion |
|--|------------------------------|
| The industry will move into deeper waters (over 100m) using economically attractive floating wind support structures | 7 |
| Bottom fixed support structures will be optimized (manufacturing, mass production, installation, design, lifetime) | 4 |
| Floating support structures will take over bottom fixed | 3 |
| Few suitable locations will be available below deep waters | 2 |
| More commercial partnering with, for instance, several support structure manufactures forming joined ventures | 2 |
| Improved and verified support structures will arise | 1 |
| A new supply chain for floating support structures as well as improved and verified concepts will arise | 2 |
| New designs of support structures for vertical-axis wind turbines | 1 |
| Oil & Gas companies will be involved in offshore wind | 1 |
| Vessels operations will be further optimized to accommodate rough weather, wave heights, etc. | 1 |
| Structures will become more flexible | 1 |

Tabla R1-Q1. Resumen de respuestas a la Pregunta 1

Pregunta 2

Offshore Wind Support Structures Look

| Main Features | Experts sharing this opinion |
|--|------------------------------|
| Updated and optimized support structures are foreseen rather than new concepts | 7 |
| New and simpler concepts will be developed | 3 |
| Support structures will no longer be made of steel but of lighter materials | |
| Support structures will be able to withstand more powerful turbines | |
| Support structures will be grouped in order to create large scale forms, harnessing synergies like O&M | |
| Support structures will hold towers with several turbines | |
| New design codes will continue evolving | |
| Damping of structures will be actively and something the customer decides on | |
| Besides the deep water market, floating support structures will get more foothold on shallower waters | |
| Monopiles will stretch its limits of application in terms of water depth | |
| Weight of jackets will be lower but complexity and cost high | |

Tabla R1-Q2. Resumen de respuestas a la Pregunta 2

Pregunta 3

Offshore Wind Support Structures Challenges

| Code | Challenges |
|------|--|
| a | Potential to bring support structure costs down despite the upscaling of weight, loads, turbine's capacity and water depth |
| b | Response to the scarcity of suitable areas in terms of soil quality and water depth |
| c | Overcoming potential supply chain bottlenecks to commercially meet the future demand (e.g., installation vessels availability) |
| d | Reduction of operation & maintenance requirements |
| | Enhancement of support structures decommissioning to reduce environmental disturbances |
| e | Increment support structures life-span |
| f | Need to create and maintain experienced and skilled staff so that workforce shortage can be avoided |
| g | Capacity to develop support structures that can deal with deeper waters |
| h | Accommodate more flexibility and movement from the structures |
| i | Establishment of achievable and accessible political and commercial conditions |
| j | Streamlining of support structures and installation vessels sourcing and competences in design to meet the goals imposed by governments in the implementation of offshore wind parks |

Tabla R1-Q3. Listado de respuestas a la Pregunta 3

Question 4

Offshore Wind Support Structures Technological Requirements

| Code | Technological Developments |
|------|--|
| A | Mass production techniques to deliver productivity gains and to reduce costs |
| B | New manufacturing methodologies that process a wider range of products requirements (materials, designs, weight, lifetime) |
| C | New support structures with little or no below water working required |
| D | Ability to assemble support structures and turbines in one go |
| E | A support structure with the capacity for putting up several turbine towers, sharing anchors and providing wave stability |
| F | Adoption of mobile support structure to perform O&M activities onshore |
| G | Unified methodologies and protocols among the different manufacturers to devote all the efforts to one generic design |
| I | Methods to accommodate the distance to shore for hub-transformer stations connecting several wind parks |
| J | Inclusion of decommissioning in the life cycle assessment |
| K | Support structure designs easily decommissioned with no marine operations required |
| , | Creating artificial island at sea and installing turbines on them to simplify installation |

| | |
|---|---|
| L | Creating artificial island at sea and installing turbines on them to simplify installation issues and maintenance activities |
| M | New O&M methods for rapid and safe access to the support structure, reducing dependency on the weather conditions |
| N | Development of support structures compatible with newer and more performant turbines |
| O | Optimizing support structure designs by integrating lighter, cheaper, more durable and hybrid composite materials |
| P | Anti-corrosion technology integrated in the support structure (e.g., use of special type of steel and coating) |
| Q | Improve current methods in the business to be implemented in a timely manner and without any conservatism (e.g., safety margins in the design supply chain) |
| R | Rather than a particular technological development it is important to maintain a constant flow of investment in research |

Tabla R1-Q4. Listado de respuestas a la Pregunta 4

4.2 Respuestas al segundo cuestionario

El segundo cuestionario fue distribuido el 3 de Agosto y el tiempo concedido a los expertos para completarlo se estableció en 10 días, 12 de Agosto incluido. Como en el caso de la ronda inicial, el ratio de participación se vio afectado por el periodo vacacional.

En general, el número de respuestas aumentó con respecto a la primera ronda, recopilándose en este caso 17 cuestionarios. Este hecho puede ser interpretado como una consecuencia de las preguntas del tipo de respuesta cerrada. Este modelo de pregunta hizo que el tiempo necesario para completar el cuestionario se viera reducido a unos escasos 5 minutos. Sin embargo, cuatro de los cuestionarios recibidos tuvieron que ser descartados por incoherencias en sus resultados. En los enunciados de la pregunta 5 y 6, los expertos fueron invitados a indicar "exclusivamente" los cinco desafíos y desarrollos tecnológicos más importantes. En las respuestas de estos cuatro cuestionarios "todas" las posibles soluciones a dichas preguntas fueron calificadas lo que se tradujo como resultados nulos. Por último, es importante señalar que de todos los participantes al segundo cuestionario, tan sólo 5 de ellos habían participado también en la primera ronda.

Tal y como ha sido indicado, el método Delphi es un proceso iterativo con aportación de feedback, es decir, en la segunda ronda los participantes reciben los resultados del grupo en la primera ronda en su conjunto. El propósito es proporcionar a los participantes con comentarios sobre las respuestas de las etapas anteriores. Las listas de las respuestas a la pregunta 3 y 4 (Tabla R1-Q3, Cuadro R1-Q4) se utilizaron para formular las dos primeras preguntas de la segunda parte. Aparte de elegir las opciones consideradas como más

importantes, cada experto otorgaba también un valor con el objeto de reflejar cómo de prioritarios eran esos desafíos y desarrollos tecnológicos.

Con respecto a las preguntas 7 y 8, los diferentes conceptos de estructuras de apoyo de energía eólica marina fueron seleccionados de acuerdo a su mayor probabilidad para superar con éxito los retos y para adaptarse a las necesidades tecnológicas seleccionadas en las preguntas anteriores.

A continuación se muestran los resultados a las cuatro preguntas del segundo cuestionario a fin de determinar la opinión del grupo de expertos.

Pregunta 5

| Offshore Wind Support Structures Challenges | | | |
|---|--|----------------|----------------|
| Code | Challenges | Rating Average | Response Count |
| a | Potential to bring support structure costs down despite the upscaling of weight, loads, turbine's capacity and water depth | 1,33 | 12 |
| g | Capacity to develop support structures that can deal with deeper waters | 2,78 | 9 |
| f | Need to create and maintain experienced and skilled staff so that workforce shortage can be avoided | 2,89 | 9 |
| i | Establishment of achievable and accessible political and commercial conditions | 2,13 | 8 |
| b | Response to the scarcity of suitable areas in terms of soil quality and water depth | 3,71 | 7 |
| d | Reduction of operation & maintenance requirements | 4,00 | 7 |
| c | Overcoming potential supply chain bottlenecks to commercially meet the future demand (e.g., installation vessels availability) | 3,60 | 5 |
| j | Streamlining of support structures and installation vessels sourcing and competences in design to meet the goals imposed by governments in the implementation of offshore wind parks | 3,50 | 4 |
| | Enhancement of support structures decommissioning to reduce environmental disturbances | 5,00 | 2 |
| h | Accommodate more flexibility and movement from the structures | 2,00 | 1 |
| e | Increment support structures life-span | 5,00 | 1 |

Tabla R2-Q5. Calificación media de los desafíos

Pregunta 6

| Offshore Wind Support Structures Technological Requirements | | | |
|---|---|----------------|----------------|
| Code | Technological Developments | Rating Average | Response Count |
| A | Mass production techniques to deliver productivity gains and to reduce costs | 1,38 | 13 |
| O | Optimizing support structure designs by integrating lighter, cheaper, more durable and hybrid composite materials | 2,50 | 6 |
| C | New support structures with little or no below water working required | 3,50 | 6 |
| B | New manufacturing methodologies that process a wider range of products requirements (materials, designs, weight, lifetime) | 2,40 | 5 |
| I | Methods to accommodate the distance to shore for hub-transformer stations connecting several wind parks | 2,80 | 5 |
| R | Rather than a particular technological development it is important to maintain a constant flow of investment in research | 4,00 | 5 |
| N | Development of support structures compatible with newer and more performant turbines | 2,75 | 4 |
| M | New O&M methods for rapid and safe access to the support structure, reducing dependency on the weather conditions | 4,25 | 4 |
| Q | Improve current methods in the business to be implemented in a timely manner and without any conservatism (e.g., safety margins in the design supply chain) | 4,50 | 4 |
| G | Unified methodologies and protocols among the different manufacturers to devote all the efforts to one generic design | 2,67 | 3 |
| P | Anti-corrosion technology integrated in the support structure (e.g., use of special type of steel and coating) | 3,67 | 3 |
| D | Ability to assemble support structures and turbines in one go | 2,50 | 2 |
| E | A support structure with the capacity for putting up several turbine towers, sharing anchors and providing wave stability | 4,50 | 2 |
| K | Support structure designs easily decommissioned with no marine operations required | 5,00 | 2 |
| L | Creating artificial island at sea and installing turbines on them to simplify installation issues and maintenance activities | 4,00 | 1 |
| F | Adoption of mobile support structure to perform O&M activities onshore | 0,00 | 0 |
| J | Inclusion of decommissioning in the life cycle assessment | 0,00 | 0 |

Tabla R2-Q6. Calificación media de los requisitos tecnológicos

Pregunta 7

| | Code | Monopile | Bravity Base | Jacket | Tripod | Tripile | Spar | Semisub. Platf. |
|---------------------------|------|----------|--------------|--------|--------|---------|------|-----------------|
| Challenge classified as 1 | a | 2 | 1 | 7 | 2 | - | 6 | 4 |
| Challenge classified as 2 | g | 1 | - | 3 | 1 | - | 6 | 6 |
| Challenge classified as 3 | f | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 6 | 5 |
| Challenge classified as 4 | i | 4 | 2 | 5 | 3 | 2 | 5 | 5 |
| Challenge classified as 5 | b | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 2 |

Tabla R2-Q7. Conceptos de estructuras de apoyo más probables de superar los 5 desafíos más importantes

Pregunta 8

| | Code | Monopile | Bravity Base | Jacket | Tripod | Tripile | Spar | Semisub. Plattf. |
|----------------------------|------|----------|--------------|--------|--------|---------|------|------------------|
| Tech. Req. classified as 1 | A | 2 | 3 | 7 | 2 | - | 7 | 5 |
| Tech. Req. classified as 2 | O | 2 | - | 2 | 1 | - | 3 | 3 |
| Tech. Req. classified as 3 | C | 3 | 3 | 3 | 3 | - | 2 | 3 |
| Tech. Req. classified as 4 | B | 2 | - | 4 | 1 | 1 | 4 | 2 |
| Tech. Req. classified as 5 | I | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 |

Tabla R2-Q8. Conceptos de estructuras de apoyo más probables de superar los 5 desarrollos tecnológicos más importantes

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Discusión

En el primer cuestionario los expertos fueron preguntados acerca de los cambios que la industria eólica marina podría experimentar en el año 2020 y de las características que las futuras estructuras de apoyo deberían presentar. Los puntos donde el consenso alcanzado ha sido mayor son:

- La industria offshore tiende a desplazarse hacia aguas cada vez más profundas. El 70 por ciento de los expertos considera que este cambio será probable gracias al desarrollo de estructuras de apoyo flotantes.
- No aparecerán nuevos conceptos de estructuras de apoyo sino que actualizaciones y optimizaciones de las estructuras de apoyo actuales. El 70 por ciento de los expertos respaldan este escenario.

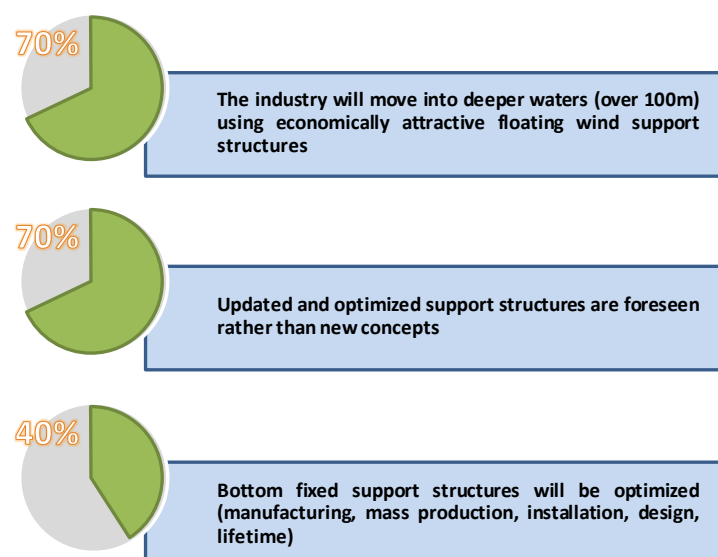


Figura 4. Consensos a las Pregunta 1 y Pregunta 2

El siguiente gráfico relaciona los principales retos identificados en el año 2020 así como las estructuras de apoyo más prometedoras de hacerles frente.

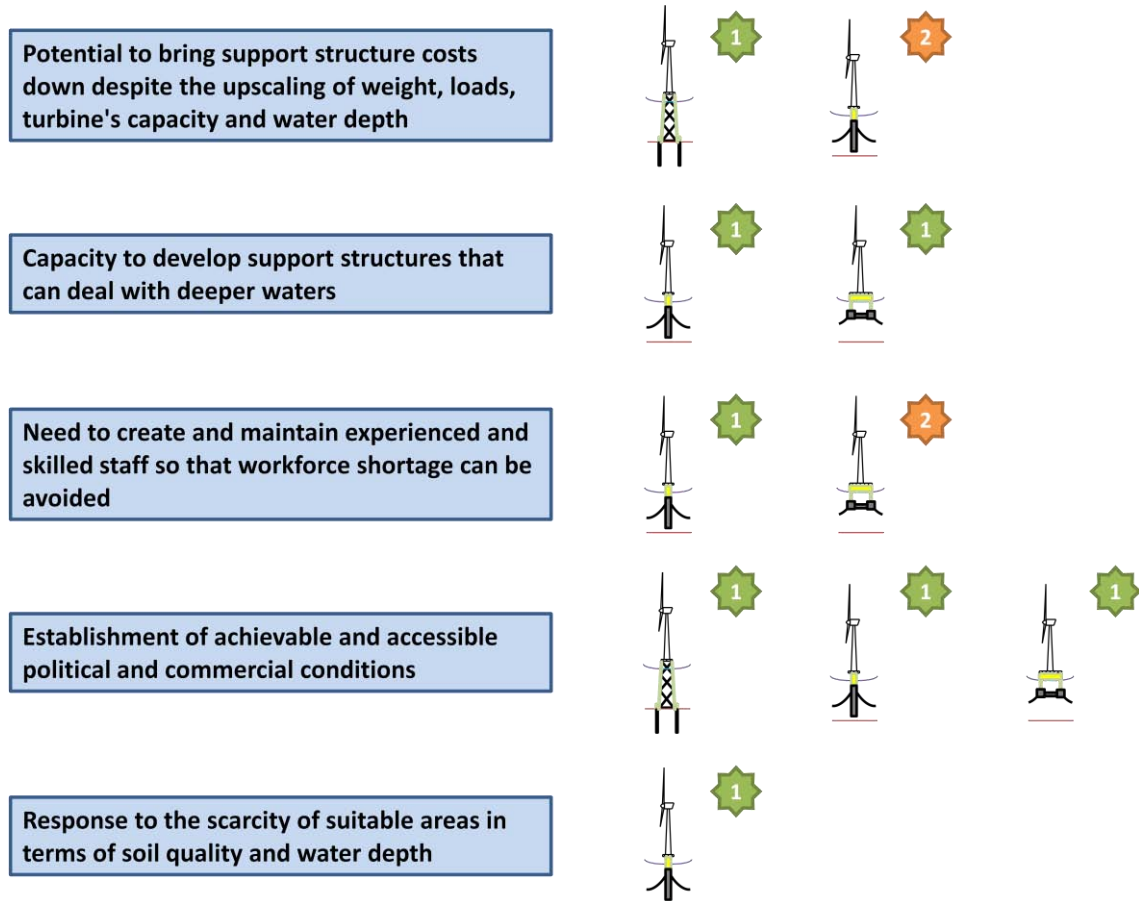


Figura 5. Relación entre los retos más importantes y las estructuras de apoyo con más éxito de hacerles frente. 1 y 2 indican las soluciones valoradas como primera y segunda elección respectivamente

En base a los datos de la [Figura 5](#), pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Monopilares, estructuras de apoyo por gravedad, trípods y tripiles son las estructuras con menor probabilidad de continuar en el mercado.
- Tripiles son las estructuras de apoyo peor valoradas por los expertos.
- Jackets son las estructuras de apoyo con mayor potencial para reducir los costes de inversión.
- Spars y paltaformas semisubmergibles presentan el futuro más prometedor en relación a la conquista de aguas profundas.
- La necesidad de mantener un alto flujo de mano de obra cualificada es un desafío común a todos los conceptos de estructuras de apoyo.

En relación a los requisitos tecnológicos a los que las estructuras de apoyo tendrán que hacer frente, un amplio número de mejoras en relación al diseño, fabricación e instalación fueron detectadas por el grupo de expertos.

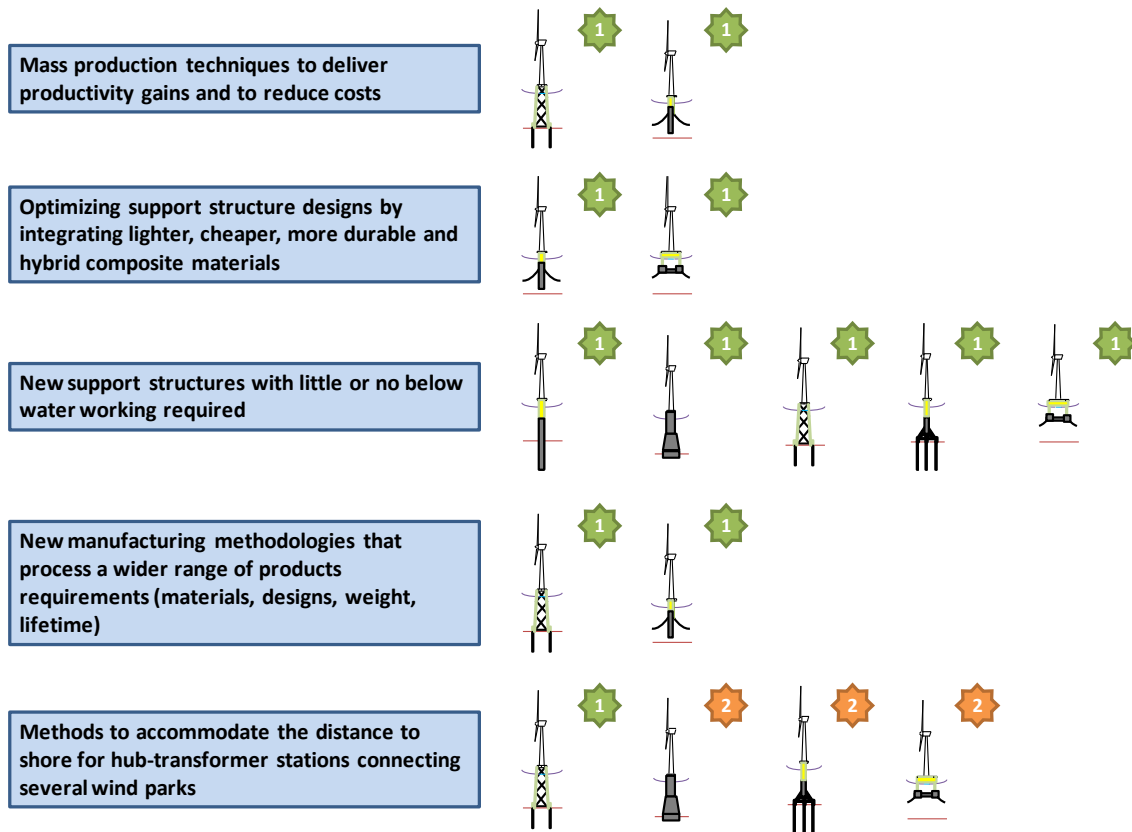


Figura 6. Relación entre los avances tecnológicos más importantes y las estructuras de apoyo con más éxito de hacerles frente. 1 y 2 indican las soluciones valoradas como primera y segunda elección respectivamente

En base a los datos de la [Figura 6](#), pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Jacket y spars son las estructuras de apoyo que mejor puntúan frente a las técnicas de producción en masa y producir mejoras de productividad y reducción de costes.
- Jacket y spars son las estructuras de apoyo con mejor puntuación en el desarrollo de nuevos procesos de fabricación para la mejora en las relaciones de peso, aumento del tiempo de vida de los materiales, etc.
- Las estructuras de apoyo flotantes presentan el mayor pronóstico para mejorar los aspectos de diseño.
- Todos los conceptos puntúan relativamente bien frente a la necesidad de reducir el trabajo bajo el nivel del agua.